

Návrh a realizace testeru teplotních čidel

Design and implementation of the
Temperature Sensor Tester

Jakub Talpa

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Radovan Hájovský Ph.D.

Ostrava 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou testování funkčnosti teplotních čidel, jmenovitě odporového čidla PT100, teplotního čidla Dallas DS18B20 a termočlánu typu K. V první části definuje základní pojmy týkající se tepelných senzorů, rozebírá způsob měření teploty, poté následuje rozdělení a popsání základních typů tepelných senzorů. V druhé části práce popisuje řešení dané problematiky při měření s teplotními čidly, hardwarový návrh testeru s popisem v blokových diagramech, poté následuje popis jednotlivých vybraných prvků, zobrazení použitých schémat a zapojení. Dále je pak popsána softwarová implementace testeru, popis použitého kódu a zjištěné problematiky při realizaci testeru v kombinaci zadaných čidel, následováno sadou kontrolních měření pro jednotlivé senzory.

Klíčová slova:

Tester teplotních čidel; teplotní senzor; měření teploty; Dallas DS18B20; termistor PT100; termočlánek typu K

Abstract

This bachelor's thesis deals with the functionality of temperature sensors, namely the resistance sensor PT100, Dallas DS18B20 temperature sensor and K-type thermocouple. The second part of the thesis describes the solution of the problem in measuring with temperature sensors, HW design of the tester with a description in block diagrams, followed by a description of individual selected elements, display of used diagrams and wiring. Furthermore, the SW implementation of the tester is described, the description of the code used and the problems identified during the implementation of the tester in a combination of specified sensors, followed by a set of control measurements for individual sensors.

Keywords:

Temperature sensor tester; temperature sensor; temperature measurement; Dallas DS18B20; PT100 thermistor; K-type thermocouple

Poděkování: Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radovanu Hájovskému Ph.D. za odborné vedení a skvělé komunikaci při jakémkoliv řešení různých problémů i v průběhu složité doby koronavirové ve které byla tato práce psána. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Veličkovi za odbornou výpomoc při výrobě plošných spojů.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	5
Seznam obrázků	6
Seznam tabulek	7
1 Úvod	8
2 Seznámení se základními typy čidel a principem měření teploty.....	9
2.1 Seznámení se s principem měření teploty	9
2.1.1. Definice základních pojmů při měření teploty	9
2.2 Základní typy teplotních čidel	10
2.2.1. Kontaktní teplotní čidla	10
2.2.2. Bezkontaktní teplotní čidla.....	17
3 Návrh a realizace HW části testeru pro senzory Pt100, DS18B20 a termočlánek typu K.....	20
3.1 Hardwarový návrh testeru pro DS18b20	21
3.2 Hardwarový návrh testeru pro PT100	21
3.3 Hardwarový návrh testeru pro Termočlánek typu K.....	23
3.4 Měření napětí a stavu baterie	24
3.5 Nabíjení, ochrana a regulace napětí baterie	25
3.6 Popis finální podoby testeru teplotních čidel	28
4 Návrh a implementace SW utility pro ovládání testeru	29
4.1 Softwarová implementace pro DS18b20	30
4.2 Softwarová implementace pro PT100.....	30
4.3 Softwarová implementace pro Termočlánek	31
4.4 Softwarová implementace pro Měření napětí baterie	32
5 Realizace sady kontrolních měření pro jednotlivé senzory.....	33
5.1 Kontrolní měření DS18b20	33
5.2 Kontrolní měření PT100	34
5.3 Kontrolní měření termočlánu typu K.....	35
6 Závěr	36
Literatura	38
Seznam příloh	40

Seznam zkratek a symbolů

C	Kapacita jednotka F (farad)
I	Proud jednotka A (ampér)
IR	Infračervené záření
NTC	Negativní teplotní koeficient (platí pro termistor)
NOK	Není v pořádku
OK	Je v pořádku
PTC	Positivní teplotní koeficient (platí pro termistor)
RTD	Odporový teplotní detektor
R	Odpor jednotka Ω (ohm)
T	Perioda jednotka s (sekunda)
V	Napětí jednotka V (volt)

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Teplotní závislost termistoru NTC [5]	10
Obrázek 2 – Charakteristiky odporové teploty spínacího PTC termistoru a silistoru [6]	12
Obrázek 3 - Zjednodušený nákres principu měření termočlánkem	13
Obrázek 4 – Znázornění chování spínače s bi-metalovým páskem	14
Obrázek 5 – Závislost odporu jednotlivých kovů na teplotě [7]	15
Obrázek 6 - Zapojení RTD ve Wheatstoneově můstku [7]	15
Obrázek 7 - Popis rozložení RTD senzoru [7]	16
Obrázek 8 – DS18B20	17
Obrázek 9 - Zapojení DS18B20 v systému OneWire	17
Obrázek 10 - Elektromagnetické spektrum [9]	18
Obrázek 11 – Optický snímač teploty [16]	18
Obrázek 12 – Složení optického pyrometru [17]	19
Obrázek 13 - Blokový diagram testeru teplotních čidel	20
Obrázek 14 – Blokový diagram zapojení DS18b20 do mikrokontroléru	21
Obrázek 15 – Blokový diagram zapojení PT100 do mikrokontroléru	21
Obrázek 16 – Úryvek z celkového schématu, se zapojením LM334, ADS1115 a referenčního senzoru PT100	22
Obrázek 17 - Úryvek z celkového schématu, se zapojením termočlánku a MCP9600	23
Obrázek 18 – Blokový diagram zapojení s MCP9600 a termočlánkem	23
Obrázek 19 - Blokový diagram měření napětí baterie	24
Obrázek 20 - Blokový diagram zapojení nabíječky, ochrany a regulace napětí baterie	25
Obrázek 21 – Schéma, podle kterého je TP4056 zapojen [21]	25
Obrázek 22 - Schéma, podle kterého je DW01A implementována do obvodu [18]	26
Obrázek 23 – Schéma vnitřního zapojení FS8205A [20]	26
Obrázek 24 – Schéma z technických listů, podle kterého je MCP1700 implementován do obvodu [19]	27
Obrázek 25 – Foto vnitřní podoby testeru	28
Obrázek 26 - Foto vnější podoby testeru	28
Obrázek 27 – Vývojový diagram hlavní části programu	29
Obrázek 28 - Vývojový diagram testovací logiky pro DS18b20	30
Obrázek 29 - Vývojový diagram testovací logiky pro PT100	30
Obrázek 30 - Vývojový diagram testovací logiky pro Termočlánek	31
Obrázek 31 - Vývojový diagram testovací logiky pro měření napětí baterie	32
Obrázek 32 – Graf změřených hodnot DS18b20	33
Obrázek 33 – Foto displeje při měření DS18b20	33
Obrázek 34 - Foto displeje při měření DS18b20	33
Obrázek 35 – Graf změřených hodnot teploty čidlem PT100	34
Obrázek 36 – Zobrazení chyby na displeji při testování PT100	34
Obrázek 37 – Zobrazení na displeji při testování PT100	34
Obrázek 38 – Graf změřených hodnot teploty termočlánkem typu K	35
Obrázek 39 – Chybové hlášení na displeji při testování termočlánku typu K	35
Obrázek 40 – Zobrazení vyčtených hodnot na displeji při testování termočlánku typu K	35

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Typy termočlánků podle barevných kódů mezinárodního standardu IEC [8]	13
Tabulka 2 – Změřené hodnoty DS18B20	33
Tabulka 3 – Změřené hodnoty PT100	34
Tabulka 4 – Změřené hodnoty termočlánkem typu K.....	35

1 Úvod

Teplota je jedna z nejvíce měřených veličin vůbec a také patří mezi základní stavové veličiny a jednotky soustavy SI. Znalost teploty je velmi důležitou součástí každodenního života, obklopuje nás na každém kroku, a proto patří měření teploty mezi základní diagnostické úkony. Existuje mnoho důvodů, proč bychom mohli potřebovat nástroj pro měření teploty. Znalost teploty je totiž zásadní pro bezpečnost a účinnost výlučně většiny strojů a zařízení. Měření teploty existuje již dlouhou dobu, sahá až do roku 150. Odhaduje se však, že skutečná věda o teploměrech se vyvinula až okolo roku 1500, kdy údajně samotný Galileo Galilei postavil zařízení, které ukazovalo změny teploty. V průběhu let byly vyvinuty různé typy teploměrů. Na počátku 19. století byla elektřina vzrušující oblastí vědeckého výzkumu a vědci brzy zjistili, že kovy se liší svou odolností a vodivostí. V roce 1821 Thomas Johann Seebeck zjistil, že se vytváří napětí, když jsou konce různých kovů spojeny a vystaveny různým teplotám. Peltier zjistil, že tento efekt je reverzibilní a lze jej použít k chlazení.

Přestože původní teploměry používaly k měření teploty kapalinu, například rtuť, dnes jsou k dispozici další možnosti. Například některé konstrukce termistorů a termočlánků používají různé kovové vodiče k měření změny napětí, které indikuje kolísání teploty.

Pro tuto bakalářskou práci je cílem návrh a realizace testeru teplotních čidel. V první části se zabývá základními pojmy týkající se teplotních senzorů a jejich základními vlastnostmi, které se snaží jednoduše a okrajově vysvětlit čtenářům, a seznámit je s problematikou testování funkčnosti teplotních senzorů. V druhé části se zabývá popisem hardwarového návrhu testeru. Zde popisuje výběr jednotlivých prvků, způsob přístupu k řešení dané problematiky a odůvodnění výběru jednotlivých komponentů použitých v obvodu testeru. Dále je v tomto bloku čtenář seznámen se schématy, podle kterých byl tester sestaven a zapojen. Ve třetí části se práce zabývá softwarovou implementací. Zde popisuje rozvržení programu, způsob ošetření různých chyb a popis použitých rovnic pro výpočty. Ve čtvrté části je obvod ověřen sadou kontrolních měření pro jednotlivé senzory a jsou zde zhodnoceny dosažené výsledky.

2 Seznámení se základními typy čidel a principem měření teploty

2.1 Seznámení se s principem měření teploty

Všichni používáme teplotní senzory v každodenním životě, ať už ve formě teploměrů samotných nebo implementovaných do různých zařízení např.: ohřívačů užitkové vody, mikrovlnek nebo chladniček. Teplotní senzory mají obvykle širokou škálu aplikací. Teplotní sensor je elektronické zařízení, které měří teplotu svého prostředí a převádí vstupní data na elektronická data, aby zaznamenávala, monitorovala nebo signalizovala změny teploty. Existuje mnoho různých typů teplotních sensorů. Některá teplotní čidla vyžadují přímý kontakt s fyzickým objektem, který je sledován (kontaktní teplotní čidla), zatímco jiná nepřímě měří teplotu objektu (bezkontaktní teplotní čidla). [1]

Z hlediska termodynamiky se teplota mění v závislosti na průměrné energii molekulárního pohybu. Jak se do systému přidává teplo, zvyšuje se molekulární pohyb a v systému dochází ke zvýšení teploty. Je však obtížné přímo měřit energii molekulárního pohybu, proto jsou teplotní senzory obecně konstruovány pro měření vlastností, které se mění v reakci na teplotu. Zařízení se poté kalibrují na tradiční teplotní stupnice za použití standardu (tj. bodu varu vody při známém tlaku). [1][2]

Kontaktní senzory, měří úroveň teploty v objektu přímým kontaktem s ním. Takové snímače teploty spadají do kategorie kontaktního typu. Mohou být použity k detekci teploty pevných látek, kapalin nebo plynů v širokém rozmezí teplot. Nejběžněji používané typy jsou: termostaty, termistory se záporným a kladným teplotním koeficientem (NTC, PTC), odporové teplotní detektory (RTD) a termočlánky. [1]

Bezkontaktní teplotní senzory jsou zpravidla infračervené (IR) senzory. Dálkově detekují IR energii vyzařovanou objektem a vysílají signál do kalibrovaného elektronického obvodu, který určuje teplotu objektu. Tyto měřiče teploty se často používají v nebezpečných prostředích, jako jsou jaderné elektrárny nebo tepelné elektrárny. [1]

2.1.1. Definice základních pojmů při měření teploty

- **Teplota** je základní fyzikální veličinou soustavy SI, kde je zapsána pod názvem termodynamická teplota, jednotkou je Kelvin (K) a vedlejší jednotkou je stupeň Celsia (°C). Nejnížší možná hodnota je teplota absolutní nuly (0 K, -273,15 °C), ke které se lze libovolně přiblížit, ale nelze jí dosáhnout.[2]
- **Termoelektrický efekt** je jev, při kterém je teplotní rozdíl přímo převeden na elektrické napětí a naopak. Termoelektrické zařízení vytváří napětí, když je na každé straně jiná teplota, naopak když na něj působí napětí, vytváří teplotní rozdíl. Tento efekt lze použít k výrobě elektřiny, k měření teploty, k ochlazení předmětů, k jejich zahřátí nebo k vaření.[2]

- **Teplotní stupnice** poskytují způsob kvantifikace a měření toho, jak horký nebo studený je materiál. Po celém světě existují čtyři hlavní teplotní stupnice – Fahrenheit a Celsius se často používají v každodenních měřeních v okolí domu, zatímco Kelvinova a Rankinova stupnice absolutní nuly se běžněji používají v průmyslu a vědách.[3]

2.2 Základní typy teplotních čidel

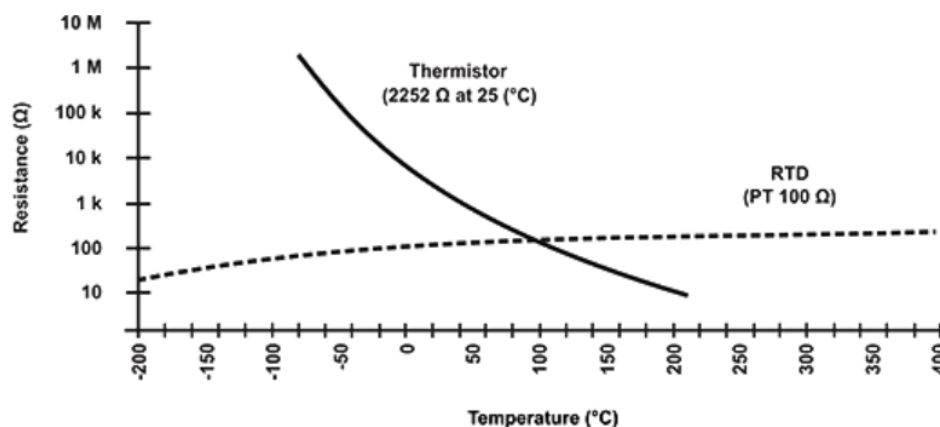
Existuje mnoho různých typů teplotních senzorů a všechny mají různé charakteristiky v závislosti na jejich skutečné aplikaci. Teplotní senzory se rozdělují do dvou základních fyzikálních typů, kontaktní a bezkontaktní. Dva základní typy kontaktních nebo bezkontaktních teplotních senzorů lze také rozdělit do následujících tří skupin senzorů: Elektromechanické, odporové a elektronické.

2.2.1. Kontaktní teplotní čidla

Některé aplikace, jako je zařízení používané k výrobě léků vyžadují, aby teplotní senzory byly citlivé a přesné pro kritickou kontrolu kvality. Některé aplikace, například teploměr v automobilu, však nevyžadují tak přesné nebo citlivé senzory.

Termistory NTC

NTC znamená „Negativní teplotní koeficient“. NTC termistory jsou rezistory se záporným teplotním koeficientem, což znamená, že odpor klesá s rostoucí teplotou. Používají se především jako odporové snímače teploty a zařízení omezující proud. Koeficient teplotní citlivosti je asi pětikrát vyšší než u snímačů teploty křemíku (silistory) a asi desetkrát vyšší než u odporových teplotních detektorů (RTD). Senzory NTC se obvykle používají v rozsahu od -55°C do 200°C . [5]



Obrázek 1 - Teplotní závislost termistoru NTC [5]

Nelineárnost vztahu mezi odporem a teplotou, kterou vykazují rezistory NTC, představovala velkou výzvu při použití analogových obvodů k přesnému měření teploty. Rychlý vývoj digitálních obvodů vyřešil tento problém umožňující výpočet přesných hodnot interpolací vyhledávacích tabulek nebo řešením rovnic které se přibližují typické NTC křivce. [5]

Jak je patrné z Obrázek 1, NTC termistory mají mnohem strmější sklon odporu a teploty, ve srovnání s odporovými teplotními detektory, což se projevuje lepší teplotní citlivostí. Přesto odporové teplotní detektory zůstávají nejpřesnějšími senzory, jejichž přesnost je $\pm 0,5\%$ měřené teploty, a jsou užitečné v teplotním rozsahu mezi $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je mnohem širší rozsah než u teplotních senzorů NTC. [5]

Nejlepší dosud známá aproximace pro přepočítání odporu na hodnotu teploty je **Steinhart-Hartův vzorec**, publikovaný v roce 1968:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad [5]$$

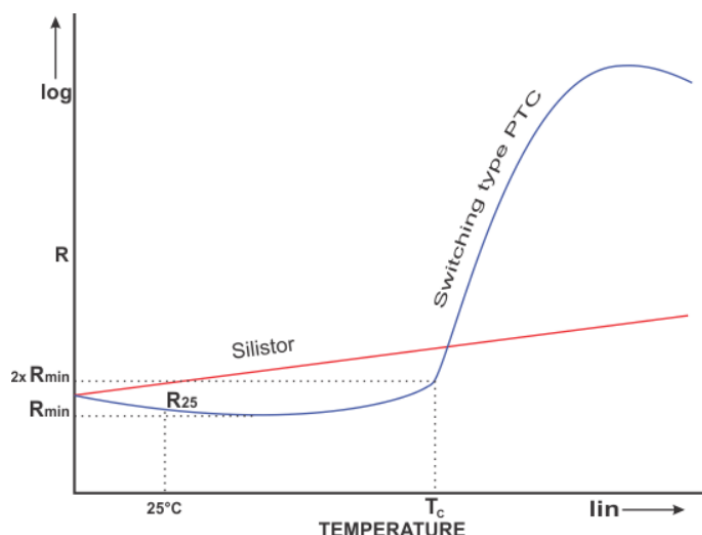
Kde $\ln R$ je přirozený logaritmus odporu při teplotě T v kelvinech kde A , B a C jsou koeficienty odvozené z experimentálních měření. Tyto koeficienty obvykle zveřejňují prodejci termistorů jako součást datového listu. Steinhart-Hartův vzorec je obvykle přesný na přibližně $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozmezí $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je pro většinu aplikací dostačující. Je-li požadována vyšší přesnost, musí být teplotní rozsah snížen a je možné dosáhnout přesnosti lepší než $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [5]

Materiály, které se typicky podílejí na výrobě NTC termistorů, jsou platina, nikl, kobalt, železo a oxidy křemíku, používané jako čisté prvky nebo jako keramika a polymery. NTC termistory lze rozdělit do pěti skupin v závislosti na použitém výrobním procesu koráلكové, skleněné, diskové, čipové a sonda.[5]

Termistory PTC

PTC znamená „pozitivní teplotní koeficient“. PTC termistory jsou rezistory s kladným teplotním koeficientem, což znamená, že odpor se zvyšuje s rostoucí teplotou. Existují dva typy PTC termistoru, které mají velmi odlišné charakteristiky, přičemž jeden vykazuje lineární nárůst, zatímco druhý vykazuje náhlou změnu odporu.

- **Spínací PTC termistor** – Tato forma termistoru PTC se používá v ohřívacích, senzory a speciální verze se také používají jako resetovatelné pojistky. Spínací termistory typu PTC mají vysoce nelineární křivku. Odpor nejprve s rostoucí teplotou mírně klesá a poté při kritické teplotě se odpor dramaticky zvyšuje, čímž působí prakticky jako spínač. Díky tomu je ideální v zařízeních na ochranu.[6]
- **Silistory** – Silistorový termistor PTC používá jako svůj základní materiál polovodič a vyznačuje se lineární charakteristikou. Ve výsledku se silistor používá v teplotních čidlech. Silistorový PTC termistor je obecně vyroben z dotovaného křemíku, přičemž úroveň dotace určuje přesné vlastnosti.[6]



Obrázek 2 – Charakteristiky odporové teploty spínacího PTC termistoru a silistoru [6]

Konstrukce a vlastnosti

Spínací termistory PTC jsou vyrobeny z polykrystalických materiálů. Často se vyrábějí pomocí směsí uhličitanu barnatého, oxidu titaničitého a přísad, jako je tantal, oxid křemičitý a mangan. Materiály jsou broušeny, míchány, lisovány do tvaru disků nebo obdélníků. Poté jsou přidány kontakty, a nakonec jsou potaženy nebo zapouzdřeny. Výrobní proces vyžaduje velmi pečlivou kontrolu materiálů a nečistot. Kontaminace řádově několika dílů na milion může způsobit velké změny v tepelných a elektrických vlastnostech.[6]

Polymerní PTC jsou vyrobeny z plátku plastu s vloženými uhlíkovými zrny. Když je zařízení chladné, uhlíková zrna jsou v těsném vzájemném kontaktu a vytvářejí vodivou cestu zařízením. Jak se zařízení zahřívá, plast se rozpíná a zrna se pohybují dále od sebe, což zvyšuje celkový odpor zařízení.[6]

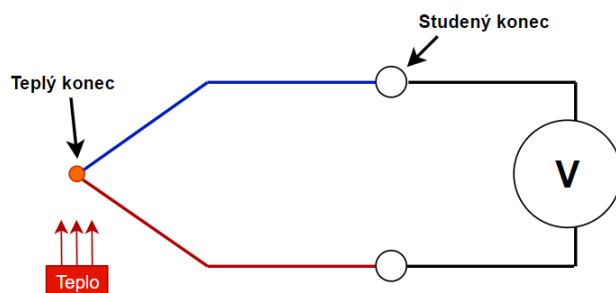
Silistory se spoléhají na objemové vlastnosti dotovaného křemíku a vykazují charakteristiky odporu a teploty, které jsou téměř lineární. Jsou vyráběny z vysoce kvalitních křemíkových destiček, vyráběných v různých tvarech.[6]

Termočlánky

Termočlánek je snímač používaný k měření teploty. Termočlánky jsou tvořeny dvojicí vodičů z různých kovů. Vodiče jsou na jednom konci svařeny dohromady, čímž se vytvoří spojení. Toto spojení je místo, kde se měří teplota viz Obrázek 3. Když na spoji dojde ke změně teploty, vytvoří se napětí v důsledku termoelektrického jevu a toto napětí lze využít pro měření teploty.[8]

Před rozbořením různých typů termočlánků je třeba poznamenat, že termočlánek je často uzavřen v ochranném plášti, aby byl izolován od vnějších vlivů. Toto ochranné pouzdro výrazně snižuje účinky koroze a obecně poškození teplého konce termočlánku ale za cenu zhoršení rychlosti odezvy na skokovou změnu teploty. Existuje mnoho typů termočlánků, z nichž každý má své vlastní jedinečné vlastnosti, pokud jde o teplotní rozsah, životnost, odolnost proti vibracím, chemickou odolnost a

kompatibilitu aplikace. Typ J, K, T a E jsou nejběžnější typy termočlánků. Termočlánky typu R, S a B se používají při vysokoteplotních aplikacích.[8]

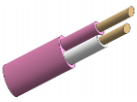
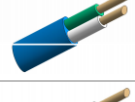
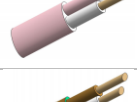



Obrázek 3 - Zjednodušený náčrtek principu měření termočlánkem

Termočlánek typu K (nikl-chrom / nikl-alumel) je nejběžnějším typem termočlánku. Je levný, přesný, spolehlivý a má široký teplotní rozsah. Typ J (Železo / Konstantan) je také velmi běžný. Má menší teplotní rozsah a kratší životnost při vyšších teplotách než typ K. Je ekvivalentní typu K z hlediska nákladů a spolehlivosti.[8]

Typy termočlánků lze dobře rozeznávat i podle zbarvení buďto konektorů termočlánku, nebo barvy vedení. Typy termočlánků podle barevných kódů určují mezinárodní standardy. Například IEC (viz Tabulka 1), je standardem v evropské unii, dále často používaným standardem je ANSI původem z Ameriky.

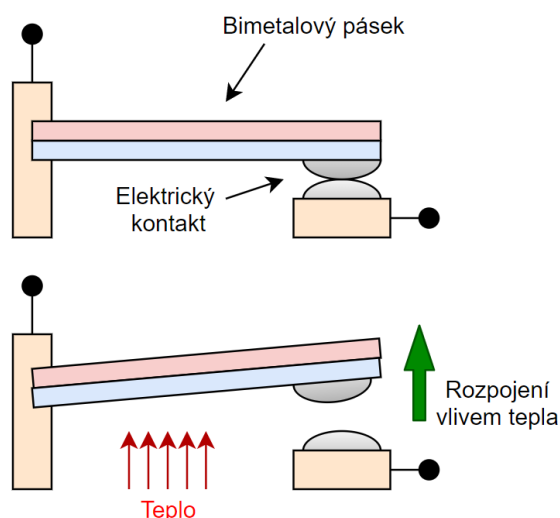
Tabulka 1 - Typy termočlánků podle barevných kódů mezinárodního standardu IEC [8]

Typy termočlánků podle barevných kódů mezinárodního standardu IEC 584-3				
Typ	Vodiče (+/-)	Teplotní rozsah	Konektor termočlánku	Prodlužovací vedení
E	Nikl chrom / Konstantan	-200 až 900 °C		
J	Železo / Konstantan	0 až 750 °C		
K	Nikl chrom/ Nikl hliník	-200 až 1250 °C		
N	Nicrosil / Nisil	0 až 1250 °C		
T	Měď / Konstantan	-200 až 350 °C		
R	Platina Rh/ Rh	0 až 1480 °C		

Termostaty

Termostat je kontaktní typ elektromechanického teplotního čidla nebo spínače, který se v podstatě skládá ze dvou různých kovů, jako je nikl, měď, wolfram nebo hliník atd, které jsou spojeny dohromady, aby vytvořily **Bi-metalový pás**. Různé rychlosti lineární expanze dvou odlišných kovů vytvářejí mechanický ohybový pohyb, když je pás vystaven teple.[4]

Bimetalový pás může být použit samostatně jako elektrický spínač nebo jako mechanický způsob ovládání elektrického spínače v termostatických ovládacích prvcích a je široce používán k ovládání topných prvků v kotlích, pecích a zásobnících teplé vody.[4]



Obrázek 4 – Znázornění chování spínače s bi-metalovým páskem

Termostat se skládá ze dvou tepelně odlišných kovů slepených k sobě. Když je teplota nízká, kontakty jsou sepnuty a proud prochází termostatem. Když teplota vzroste, jeden kov se roztáhne více než druhý a spojený bimetalový pás se ohne nahoru (nebo dolů) a rozpojí kontakty.[4]

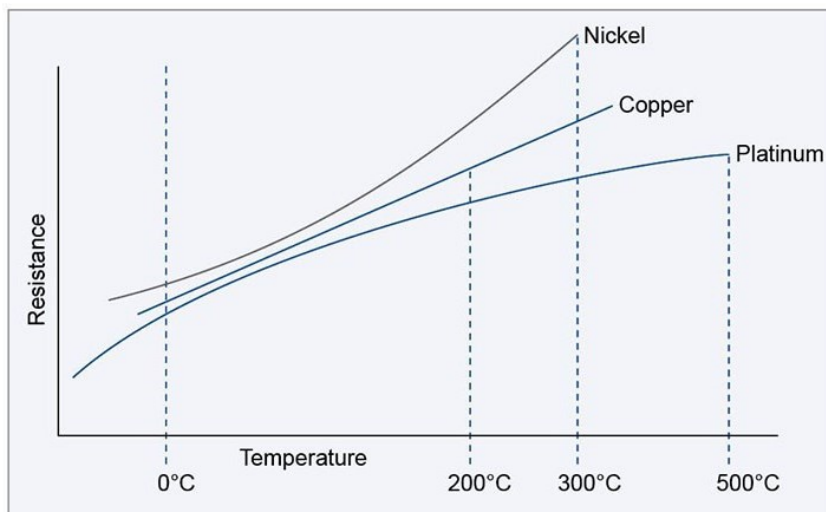
Odporový teplotní detektor (RTD)

RTD znamená odporový teplotní detektor. Odporové teplotní detektory se někdy obecně označují jako odporové teploměry. RTD je teplotní senzor, který měří teplotu pomocí principu změny odporu kovu s teplotou. V praxi se elektrický proud přenáší přes kus kovu (prvek RTD nebo odpor) umístěný v blízkosti oblasti, kde se má měřit teplota. Tato hodnota odporu pak koreluje s teplotou na základě známých charakteristik odporu prvku RTD.[7]

Prvky RTD jsou obvykle dělené do tří konfigurací podle výrobní technologie:

- platinová nebo kovová skleněná pasta nanesená nebo prosetá na malý plochý keramický substrát v tenké vrstvě[7]
- platinový nebo kovový drát navinutý na skleněné nebo keramické cívice zapečetěný vrstvou roztaveného skla[7]
- Částečně podepřený vinutý prvek, kterým je malá cívka drátu vložená do otvoru v keramickém izolátoru a připojená podél jedné strany tohoto otvoru. [7]

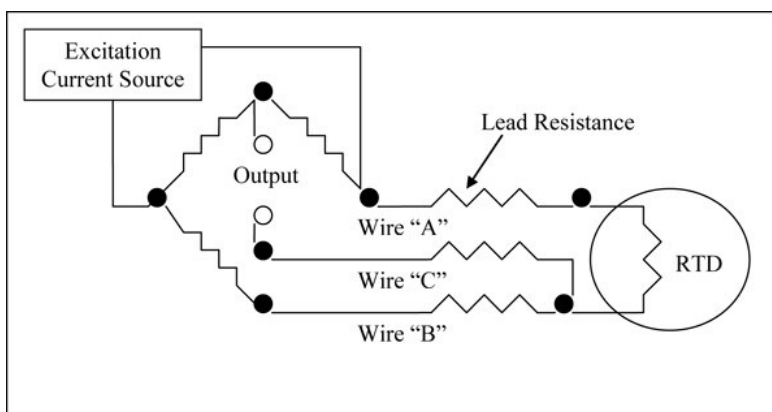
Platina je nejběžněji používaným kovem pro prvky RTD díky řadě faktorů jako jsou chemická inertnost, téměř lineární vztah teploty a odporu, teplotní koeficient odporu, který je dostatečně velký, aby poskytoval snadno měřitelný odpor. [7]



Obrázek 5 – Závislost odporu jednotlivých kovů na teplotě [7]

Proč se RTD někdy nazývají 2, 3 nebo 4-vodičové RTD? A proč bych chtěl jednu konfiguraci RTD místo jiné?

Jednoduchým pravidlem je, že čím více vodičů má RTD, tím přesnější je. Celá sestava RTD není platinová. Mimo jiné by byla konstrukce RTD tímto způsobem pro většinu účelů neúnosně nákladná. Výsledkem je, že samotný RTD prvek je vyroben z platiny. Izolované měděné vodiče pak typicky spojují RTD prvek s měřicím přístrojem. [7]



Obrázek 6 - Zapojení RTD ve Wheatstoneově můstku [7]

Stejně jako platina má měď určitou hodnotu odporu. Odpor vodičů, kterými je RTD připojen vnáší do měření odchylku. Při dvouvodičovém zapojení nelze určit velikost této chyby, což při větší délce vedení značně snižuje přesnost měření. Ve výsledku jsou dvouvodičové RTD nejméně běžné a obecně se používají tam, kde je zapotřebí pouze přibližná hodnota teploty. [7]

3vodičové RTD jsou nejvíce používané pro průmyslové aplikace. Při 3vodičovém zapojení RTD se obvykle využívá Wheatstoneova můstku pro kompenzaci odporu vedení. Je důležité, aby délka přírodních vodičů byla identická. [7]

4vodičové RTD jsou ještě přesnější než jejich 3vodičové protějšky, protože jsou schopny zcela kompenzovat odpor vodičů, aniž by musela být věnována zvláštní pozornost délce každého z vodičů. To může poskytnout výrazně zvýšenou přesnost při relativně nízkých nákladech. [7]

Obvyklé parametry nabízených RTD

Platinový odporový prvek:

Toto je část RTD snímající skutečnou teplotu. Délka prvků je zpravidla od 3,175mm do 70mm. Existuje mnoho možností. Standardní teplotní koeficient je α 0,00385 a standardní odpor je 100 Ω při 0°C.

Vnější průměr:

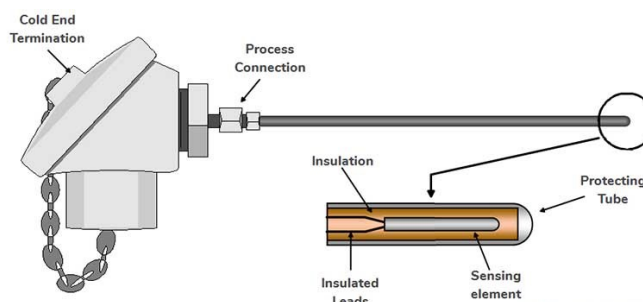
Nejběžnější vnější průměr je 6 mm (0,236").

Materiál jímek RTD:

316 Nerezová ocel se běžně používá pro sestavy do 260 °C. Nad 260 °C se doporučuje použít Inconel 600 což je slitina niklu a chromu která je speciálně legována.

Konfigurace vodičů RTD:

RTD jsou k dispozici ve 2, 3 a 4vodičové konfiguraci. Konfigurace se 3 vodiči jsou nejběžnější pro průmyslové aplikace. Teflon a sklolaminát jsou standardními izolačními materiály drátu. Teflon je odolný proti vlhkosti a lze jej použít až do 200 °C. Sklolaminát lze použít až do 550 °C.



Obrázek 7 - Popis rozložení RTD senzoru [7]

Polovodičový senzor Dallas 18B20

DS18B20 je teplotní snímač, který může měřit teplotu od -55 °C do +125 °C, s přesností $\pm 5\%$. Využívá z 1-vodičového (OneWire) protokolu, který přinesl revoluci v digitálním světě. OneWire je protokol pokročilé úrovně a každý model DS18B20 je vybaven sériovým 64 bitovým kódem, který pomáhá při ovládání více senzorů pomocí jednoho pinu mikrokontroléru. Jednoduše řečeno, přiřazuje různé adresy všem připojeným senzorům a voláním adresy získáte hodnotu změřenou těmito senzory. DS18B20 se běžně používá v průmyslových projektech, kde je nutná vysoká přesnost.

DS18B20 má celkem 3 piny:

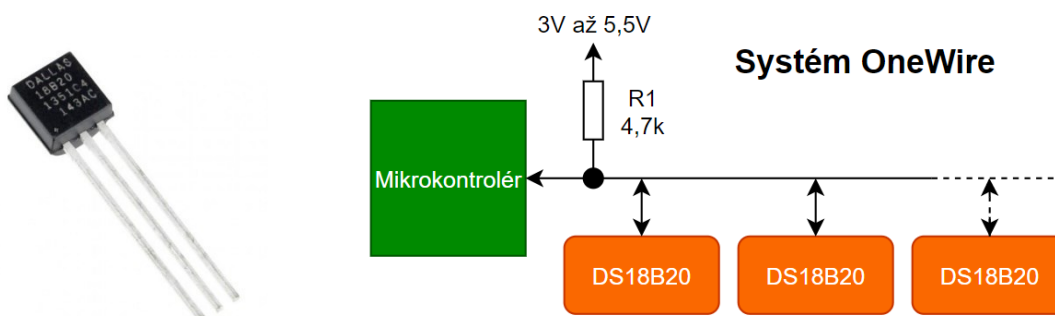
Pin#1 = Vcc (napájení 3-5,5V)

Pin#2 = Data pin (Datový pin na vyčítání údajů o teplotě)

Pin#3 = GND (uzemnění)

OneWire je vytvořená sběrnice od firmy Dallas Semiconductor Corp. pro komunikaci zařízení nízkou datovou rychlostí. OneWire je velmi podobná sběrnici I2C jen s nižší datovou propustností a delším dosahem. Charakteristickým rysem této sběrnice je možnost využití parazitního napájení. To znamená že pin pro komunikaci je společný s kladným napájecím pinem.

DS18B20 funguje na principu přímého převodu teploty na digitální hodnotu. Jeho hlavním rysem je změna počtu bitů podle změny teploty. DS18B20 je konstruován se dvěma typy pamětí SRAM a EEPROM.



Obrázek 8 – DS18B20

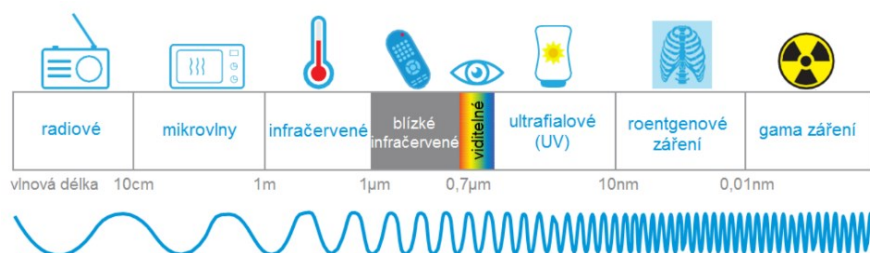
Obrázek 9 - Zapojení DS18B20 v systému OneWire

2.2.2. Bezkontaktní teplotní čidla

Spektrum světla poprvé objevil v roce 1666 sir Isaac Newton. Když procházel paprsek slunečního světla hranolem, pozoroval, jak se světlo rozdělilo do barevného pásma zvaného spektrum. V roce 1880 sir William Herschel detekoval relativní energii každé barvy. Zjistil také, že energie existuje za červeným (viditelným) koncem spektra. Kolem roku 1900 vědci Planck, Stefan, Boltzmann, Wien a Kirchhoff definovali různé aspekty elektromagnetického spektra a formulovali rovnice pro popis infračervené energie. Bezdotykové přístroje detekují množství infračerveného (IR) záření, které objekt vyzařuje, rychle reagují a lze je použít k měření teplot předmětů v pohybu nebo ve vakuu nebo obtížně přístupných z jiných důvodů. Infračervené teploměry, nazývané také py-rometry, jsou sofistikované snímače, které se dnes běžně používají v různých oblastech, od výzkumu a vývoje až po průmyslové a výrobní aplikace. [9]

Všechna tělesa s teplotou nad 0°K vyzařují infračervenou energii. Infračervené záření je část elektromagnetického spektra, která leží mezi viditelným světlem a rádiovými vlnami. Rozsah vlnových délek infračerveného záření leží mezi 0,7 μm a 1 000 μm , jak je znázorněno na Obrázek 10. V praxi jsou však v tomto širokém rozsahu vhodné pro měření teplot pouze vlnové délky mezi 0,7 a 20 μm . V

současné době nejsou na trhu žádné detektory, které by byly dostatečně citlivé na měření malého množství energie vyzařovaného nad 20 μm . [9]



Obrázek 10 - Elektromagnetické spektrum [9]

Radiační teploměry

Radiační teploměry měří teplotu na základě záření uvolněného z objektu. Schopnost objektu uvolňovat záření se nazývá emisivita. Čím emisivnější je předmět, tím s více záření musí senzor pracovat. Sensory v této kategorii zahrnují bodová měřicí zařízení, která mohou produkovat 1-D a 2-D odečty teploty, a termální zobrazovací teploměry, které mohou zobrazovat údaje o teplotě jako 2-D obraz. Tyto typy vizuálních reprezentací jsou užitečné z hlediska průmyslových procesů, protože mohou pomoci identifikovat potenciální problémy nebo nesrovnalosti. Výsledná zpětná vazba pak může poskytnout zvýšenou kvalitu a produktivitu. Radiační teploměry se vyskytují v mnoha oblastech, včetně klíčové role v lékařském průmyslu, kde monitorují teplotu člověka. Navíc je lze použít k řízení a monitorování teploty budovy. [15]

Termokamery

Ačkoli jsou termokamery typem radiačního teploměru, mají několik jedinečných vlastností, které je odlišují. Namísto měření teploty na základě záření v daném bodě na objektu může termokamera měřit dvourozměrný prostor, který v podstatě poskytuje přesný obraz zdroje záření i prostoru kolem něj. Termokamery mohou být použity k lokalizaci oblastí v kabelu, které se přehřívají. Obdobně jako je hasiči využívají k lokalizaci lidí uprostřed kouře a ohně. Zařízení lze také použít k lokalizaci úniků tepla v budovách se slabou izolací. [15]

Optické snímače teploty

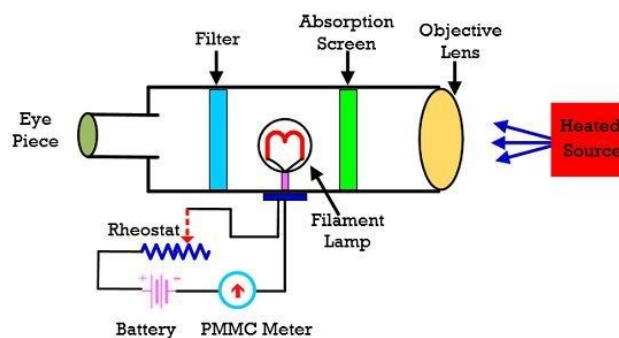
Mnoho teplotních senzorů z optických vláken je pouze variací radiačních teploměrů. Mají poměrně jednoduchou konstrukci. Optická vlákna jsou vybavena aktivním snímacím zařízením připojeným k systému, který zpracovává data o záření a provádí odečet teploty. Jsou mimořádně užitečné v automobilových aplikacích, protože mohou nastavit teplotní limitní signál pro motory. [16]



Obrázek 11 – Optický snímač teploty [16]

Optické pyrometry

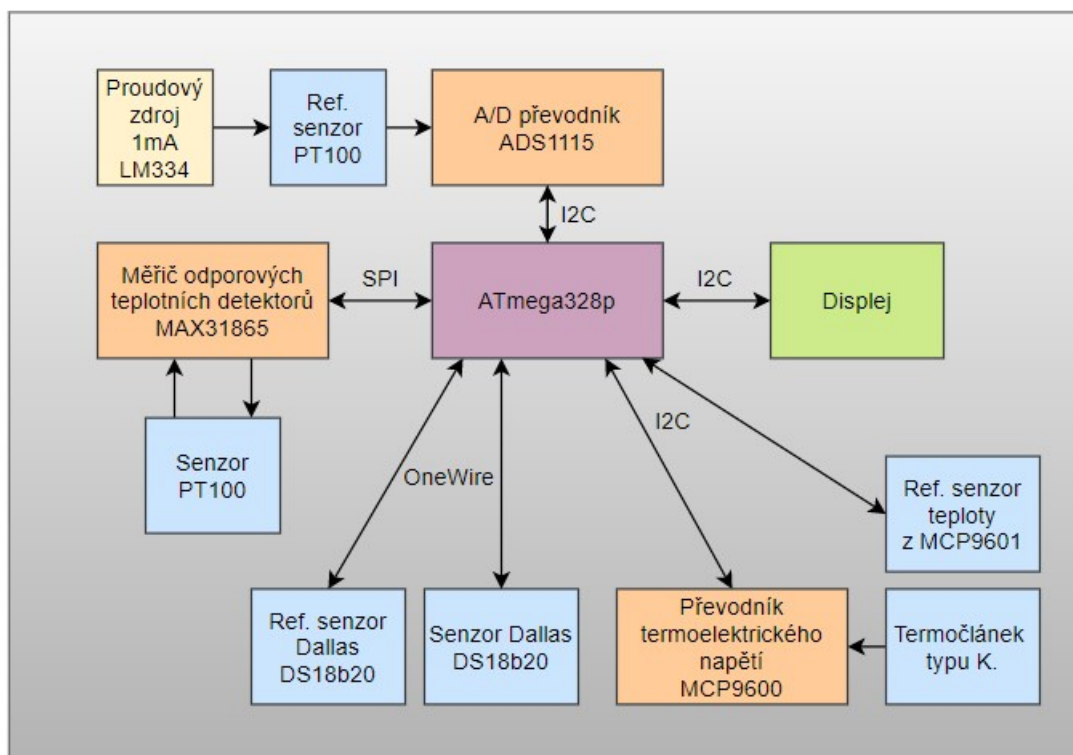
Název pyrometr pochází z řečtiny a doslova znamená „měřit oheň“. Optické pyrometry dostávají takový smysluplný název, protože dokážou měřit teploty, jejichž IR záření je příliš vysoké pro ostatní typy bezkontaktních teploměrů. Pyrometr má dvě části: optický systém a detektor. K provedení správného odečtu teploty optický systém pracuje se zaměřením vybrané oblasti tepelného záření na detektor, který zase převádí data na čitelnou teplotu. Tento konkrétní typ měřicího zařízení je zvláště užitečný pro měření teploty pohybujících se předmětů nebo předmětů, kterých se nelze dotknout – je to užitečný nástroj při tavení, kde je teplota kovu nezbytnou součástí operace.[17]



Obrázek 12 – Složení optického pyrometru [17]

3 Návrh a realizace HW části testeru pro senzory Pt100, DS18B20 a termočlánek typu K

Jako řídicí mikrokontrolér celé implementace testeru teplotních čidel jsem vybral ATmega-328P od firmy Microchip (bývalý Atmel). Jedná se o vysoce výkonný 8bitový mikrokontrolér, který kombinuje 32 kB flash paměť s možnostmi čtení během zápisu, 1024B EEPROM paměť, 2 KB SRAM paměť, 23 univerzálních vstupně výstupních pinů, 32 univerzálních pracovních registrů, sériové programovatelné USART, bajtově orientované dvouvodičové sériové rozhraní (I2C – Microchip používá označení TWI), sériový port SPI, 6-kanálový 10-bitový A / D převodník, programovatelný časovač watchdog s interním oscilátorem a pět softwarově volitelných režimů úspory energie.

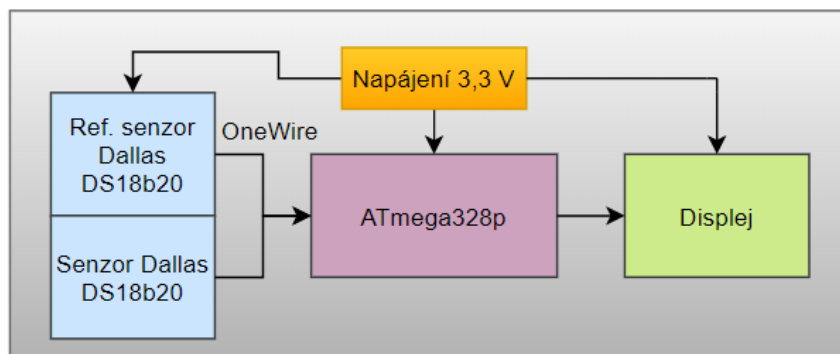


Obrázek 13 - Blokový diagram testeru teplotních čidel

Jako modul displeje jsem zvolil I2C OLED displej 0,96", s bílými znaky a kompaktními rozměry, který je vhodný především pro realizaci přenosných zařízení. Pracuje na hlavním čipu SSD1306 s řadičem pro grafický zobrazovací systém s diodou emitující světlo a maticovým displejem. Má vysoké rozlišení (128x64 bodů), nízkou spotřebu, vysoký kontrast a pracuje na multi-masterové počítačové sériové sběrnici I2C.

3.1 Hardwarový návrh testeru pro DS18B20

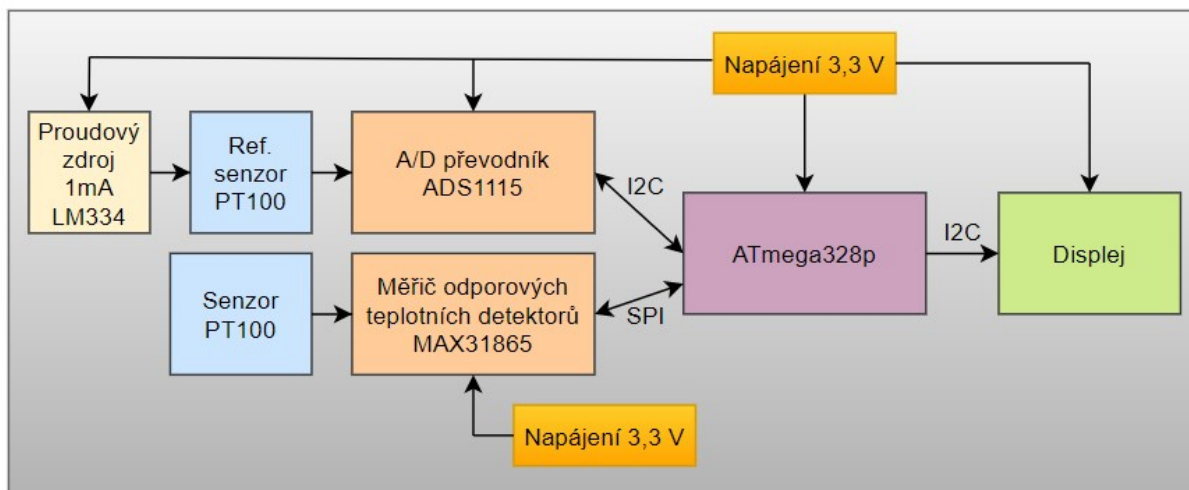
DS18B20 komunikuje po 1-vodičové sběrnici, která ze své podstaty vyžaduje pouze jednu datovou linku (a zem) pro komunikaci s centrálním mikrokontrolérem. Proto mají oba (jak zkoušený, tak i referenční teplotní senzor) senzory zapojeny datové piny do jednoho vstupního portu mikrokontroléru. V mé implementaci nevyužívám napájení přímo z datové linky („parazitní“), ale externí napájení 3,3V doplněné o pull-up rezistor spojující napájecí a datovou linku. Řešení testování je obsaženo v kapitole 4.1 Softwarová implementace pro DS18B20.



Obrázek 14 – Blokový diagram zapojení DS18B20 do mikrokontroléru

3.2 Hardwarový návrh testeru pro PT100

U hardwarového návrhu pro testování PT100, jsem zvolil postup pro referenční čidlo a zkoušené čidlo odlišně.



Obrázek 15 – Blokový diagram zapojení PT100 do mikrokontroléru

Referenční senzor PT100 je napájen proudovým zdrojem LM334, který je nastaven R_{set} odporem na výstupní proud 1mA. Dále jsem se rozhodl využít 16-bitový A/D převodník ADS1115, který komunikuje s mikrokontrolérem po multi-masterové počítačové sériové sběrnici I2C. Jedná se o nejčastěji využívaný A/D převodník pro měření s teplotními senzory. U A/D převodníku ADS1115 není potřeba zavádět externí referenční napětí, jelikož má vlastní interní referenční napětí, které je závislé na napájecím napětí. Jelikož je v obvodu implementováno stálé napětí 3,3V tak je pro tuto aplikaci ideální. Dále pak velkou výhodou u ADS1115 je, že má integrovaný programovatelný komparátor.

The schematic diagram shows the following components and connections:

- R1**: A 2k2 resistor connected between the top rail and the input of the LM334.
- PTREF**: A component with two pins, 1 and 2, connected to the input of the LM334.
- LM334**: A precision centrab voltage source. Its pins are connected as follows:
 - Pin 1 (R): Connected to the top rail.
 - Pin 2 (V₋₁): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 3 (V₋₂): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 4 (V₋₃): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 5 (V₊): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 6 (NC₂): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 7 (V₋₄): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 8 (V₋₃): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 9 (NC₁): Connected to the input of the LM334.
- ADS1115DGST**: A precision centrab voltage source. Its pins are connected as follows:
 - Pin 1 (ADDR): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 2 (ALERT/RDY): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 3 (GND): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 4 (AIN0): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 5 (AIN1): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 6 (SCL): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 7 (SDA): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 8 (VDD): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 9 (AIN3): Connected to the input of the LM334.
 - Pin 10 (AIN2): Connected to the input of the LM334.

Pro zkoušený senzor PT100 jsem se rozhodl využít čip MAX31865. Jedná se o snadno použitelný převodník odporu na digitální signál optimalizovaný pro platinové odporové teplotní detektory (RTD). Externí rezistor nastavuje citlivost použitého RTD a přesný sigma-delta A/D převodník převádí poměr odporu RTD k referenčnímu odporu do digitální podoby. Vstupy MAX31865 jsou chráněny proti poruchám přepětí.

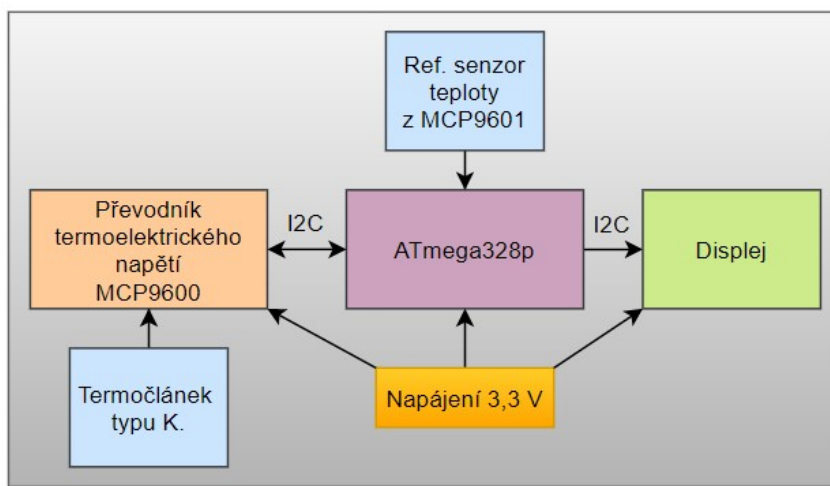
- Použití snižuje systémové náklady, zjednodušuje návrhové úsilí a zkracuje dobu návrhového cyklu
- Jednoduchý převod odporu RTD na digitální hodnotu
- Zpracovává platinové odporové teplotní detektory v rozsahu 100 Ω až 1 k Ω (při 0 °C), to znamená, že při využití MAX31865 lze testovat jak PT100, tak i PT1000
- Kompatibilní s 2-vodičovým, 3-vodičovým a 4-vodičovým připojením snímače
- 15bitové rozlišení A/D převodníku
- Celková přesnost za všech provozních podmínek (0,05% plného rozsahu)
- Maximální čas převodu 21ms
- Integrovaná detekce poruch
- Ochrana vstupu $\pm 45V$ proti přepětí
- Detekce chyb (odpojený RTD prvek, RTD zkratovaný na napětí mimo rozsah nebo zkrat přes RTD prvek)

22

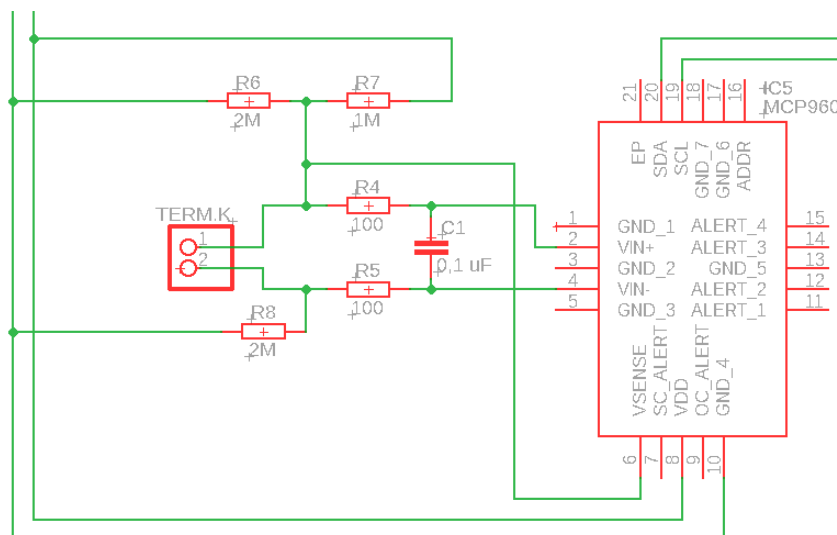
3.3 Hardwarový návrh testeru pro Termočlánek typu K

Pro testování termočlánu typu K jsem se rozhodl využít převodníku termoelektrického napětí od firmy Microchip Technology MCP9600.

MCP9600 je plně integrovaný převodník termoelektrického napětí na stupně Celsia s integrovanou kompenzací studeného konce. MCP9600 podporuje 8 typů termočlánu (K, J, T, N, S, E, B a R). Dále MCP9600 poskytuje uživateli programovatelné registry, což zvyšuje flexibilitu designu pro různé aplikace snímání teploty. Registry umožňují uživatelsky volitelná nastavení, například režimy nízké spotřeby pro aplikace napájené z baterie a čtyři individuálně programovatelné výstupy výstrahy pro kritické teploty, které lze použít k detekci více teplotních zón.



Obrázek 18 – Blokový diagram zapojení s MCP9600 a termočlánkem



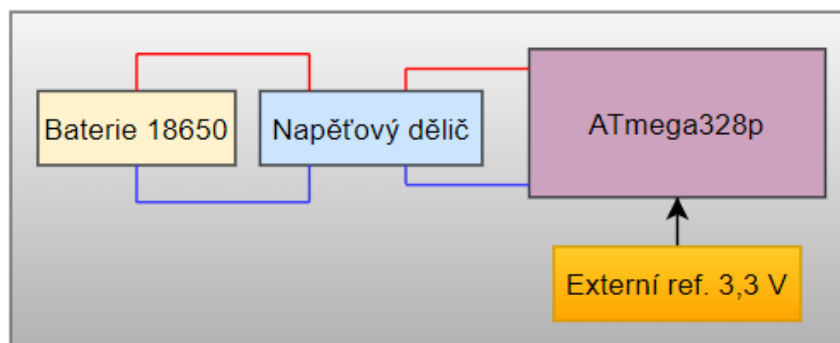
Obrázek 17 - Úryvek z celkového schématu, se zapojením termočlánu a MCP9600

Termočlánek je připojen na vstup 18-bitového A/D převodníku sigma-delta, přes „Low-Pass“ filtr neboli filtr typu dolní propust, který je zde použit pro odstínění nežádoucího vysokofrekvenčního rušení.

MCP9600 obsahuje integrovaný synchronizační filtr prvního řádu, který funguje jako anti-aliasing. Aliasing nastane, když vstupní signál obsahuje časově proměnné signály s frekvencí vyšší než polovina vzorkovací frekvence. V podmínkách aliasingu může A/D převodník odesílat neočekávané kódy. Dále je implementován obvod pro detekci zapojení na prázdko s využitím napěťového děliče. V tomto zapojení, po výpisu z registru STATUS může MCP9600 zjišťovat zapojení na prázdko a zkrat na termočlánek. MCP9600 následně převádí termoelektrické napětí na hodnotu teploty a zapíše ji do multi-masterové počítačové sériové sběrnice I2C.

3.4 Měření napětí a stavu baterie

Pro měření napětí baterie, jsem se rozhodl využít 10-bitový A/D převodník integrovaný vně mikrokontroléru ATmega328P. Navržený tester teplotních čidel je napájen baterií 18650. Její hodnota napětí při maximálním nabití je 4,2 V. Regulační obvod popsany v kapitole 3.5 Nabíjení, ochrana a regulace napětí baterie, ustaluje napájecí napětí pro celý tester na stálých 3,3 V. Toto napětí je přivedeno na vstupní pin AREF, tudíž je využito jako externí referenční napětí pro integrovaný A/D převodník.



Obrázek 19 - Blokový diagram měření napětí baterie

Vstupní napětí je do A/D převodníku přivedeno přes napěťový dělič, který omezuje vstupní napětí pod 3,3 V. Napěťový dělič je zde použit proto, aby nedocházelo ke stavu, kdy by při maximálním nabití baterie bylo vyšší vstupní napětí než referenční. Minimální hodnota napětí, kterou bude dodávat baterie je 2,9V. To znamená že minimální výstupní hodnotou z napěťového děliče bude 2,175V. Tímto jsou definovány horní a spodní hranice (0-100%) pro následný výpočet procentuálního stavu baterie.

Výpočet procentuálního stavu baterie je následovný:

$$100\% = 3,3V \quad 0\% = 2,175V$$

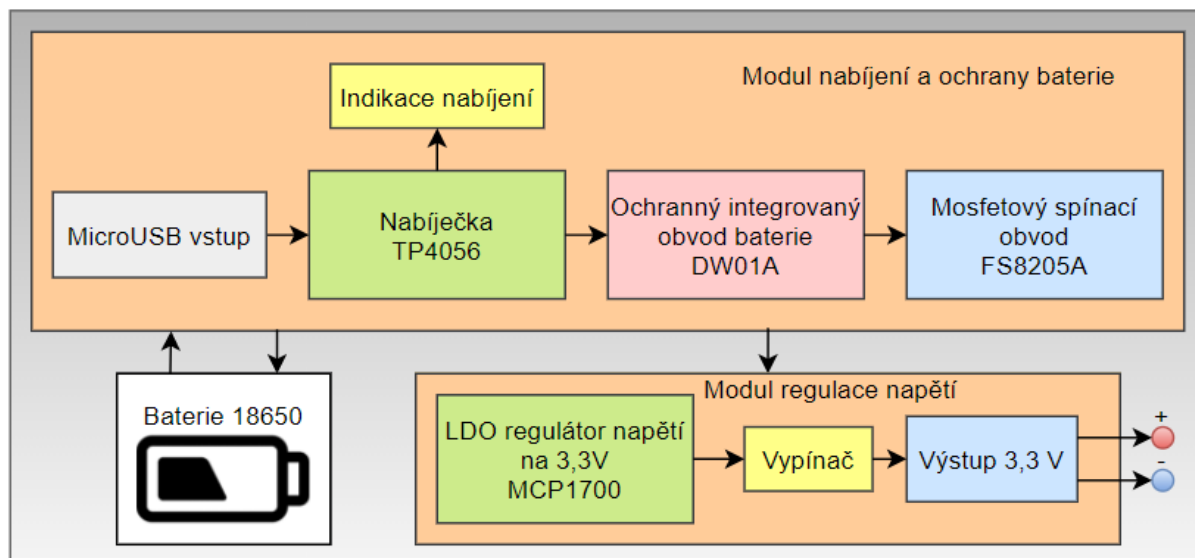
$$3,3 - 2,175 = 1,125V \quad \frac{1,125}{100} = 0,01125$$

$$\frac{(Změřené\ napětí) - 2,175}{0,01125} = Procentuální\ stav\ baterie$$

Displej následně zobrazuje jak převedenou hodnotu napětí baterie z A/D převodníku, tak i procentuální stav baterie. V kódu je i implementováno zobrazování upozornění při stavu nižším, než je 20% z celkového procentuálního stavu baterie.

3.5 Nabíjení, ochrana a regulace napětí baterie

Celé zapojení rozdělují do tří bloků (modulů), které jsou implementovány ve společném zapojení jak pro regulaci výstupního napětí, tak i pro ochranu baterie a její nabíjení.



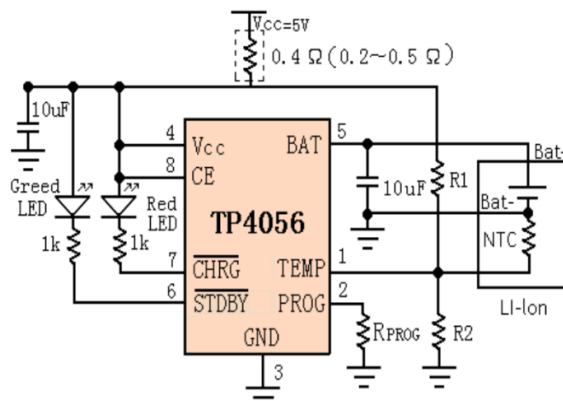
Obrázek 20 - Blokový diagram zapojení nabíječky, ochrany a regulace napětí baterie

TP4056 – Nabíjení

TP4056 je kompletní lineární nabíječka s výstupním konstantním proudem / konstantním napětím pro jednočlávkové lithium-iontové baterie. Díky nízkému počtu potřebných externích komponent je TP4056 ideální pro přenosné aplikace.

Z důvodu vnitřní architektury PMOSFET není vyžadována žádná blokovácí dioda, která by bránila zápornému proudu nabíjecího obvodu. Tepelná zpětná vazba reguluje nabíjecí proud za účelem omezení teploty baterie během provozu s vysokým výkonem nebo při vysoké teplotě okolí. Nabíjecí napětí je pevně stanoveno na 4,2 V a nabíjecí proud lze naprogramovat externě pomocí jediného odporu. TP4056 automaticky ukončí nabíjecí cyklus, když nabíjecí proud klesne na 1/10 naprogramované hodnoty po dosažení konečného plovoucího napětí.

Mezi další funkce patří monitor proudu, blokování podpětí, automatické dobíjení a dva stavové piny, které indikují ukončení nabíjení a přítomnost vstupního napětí.

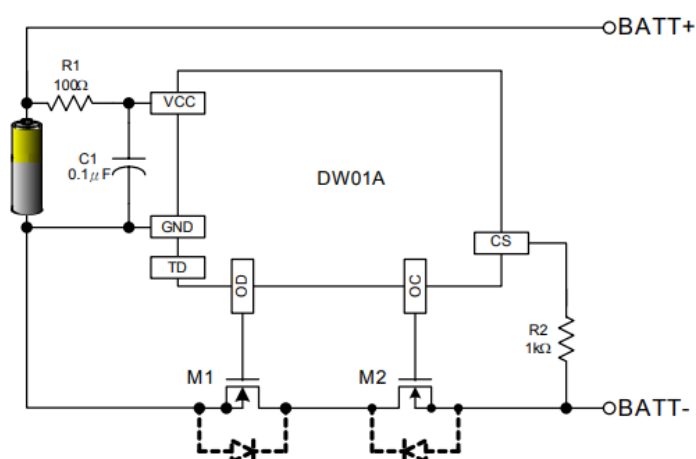


Obrázek 21 – Schéma, podle kterého je TP4056 zapojen [21]

DW01A – Ochrana

Ochranný integrovaný obvod baterie DW01A je navržen tak, aby chránil lithium-iontovou nebo polymerovou baterii před poškozením nebo snížením životnosti v důsledku přebíjení, nadměrného vybíjení nebo nadproudu pro jednočláňkové systémy napájené lithium-iontovou nebo polymerní baterií.

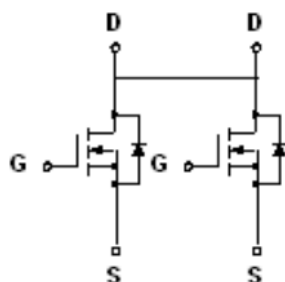
Díky velmi malému pouzdru a opět malým potřebným množství externích komponentů je DW01A ideální pro implementaci do omezeného prostoru okolo baterie a pro přenosná zařízení. Přesné detekční napětí pro přebíjení $\pm 50\text{mV}$ zajišťuje bezpečné a plné využití nabíjení.



Obrázek 22 - Schéma, podle kterého je DW01A implementována do obvodu [18]

FS8205A – Spínací obvod

Jedná se o integrovaný obvod dvou tranzistorů typu mosfet. Dále se pak jedná se o nejčastěji využívaný integrovaný obvod pro přenosná zařízení a systémy napájené z baterie. FS8205A je připojen k ochrannému modulu podle doporučeného zapojení na Obrázek 22.



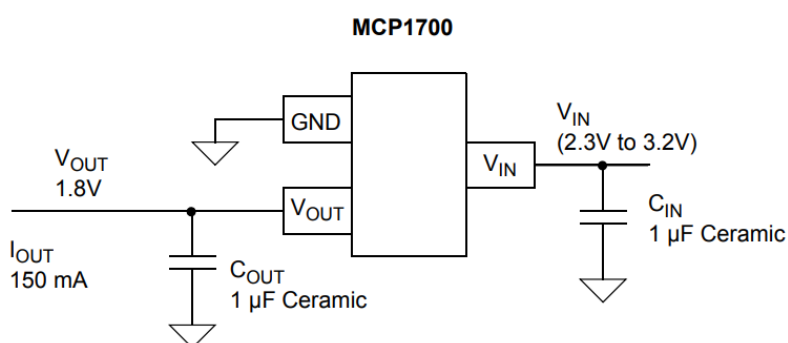
Obrázek 23 – Schéma vnitřního zapojení FS8205A [20]

MCP1700 – Regulace

MCP1700 patří do rodiny CMOS nízkonapěťových regulátorů napětí (LDO), které mohou dodávat až 250 mA proudu, při klidové spotřebě proudu pouze 1,6 μ A. Vstupní provozní rozsah je specifikován od 2,3 V do 6,0 V, takže je ideální volbou pro aplikace s jedním lithium-iontovým bateriovým článkem.

MCP1700 je schopen dodávat 250mA pouze s 178mV rozdílem vstupního a výstupního napětí. Tolerance výstupního napětí MCP1700 je obvykle $\pm 0,4\%$ při +25 °C a maximálně $\pm 3\%$ v rozsahu provozních teplot od -40 °C do + 125 °C.

Výstup regulátoru je stabilní při použití výstupní kapacity 1 μ F. Pro vstup a výstup v mé implementaci jsem se rozhodl použít keramické kondenzátory, podle doporučeného zapojení z technických listů MCP1700 na Obrázek 24. Omezení nadproudu a vypnutí přehřátí poskytují robustní řešení pro jakoukoli aplikaci.



Obrázek 24 – Schéma z technických listů, podle kterého je MCP1700 implementován do obvodu [19]

Hodnota vstupního napětí přivedená na pin V_{IN} je při maximálním nabití baterie 4,2V. Regulovaná hodnota napětí na výstupu, podle vybraného typu MCP1700 je 3,3V.

3.6 Popis finální podoby testeru teplotních čidel

Ve zkompleťované podobě na Obrázek 25 lze vidět že tester obsahuje dvě vyrobené desky plošných spojů. Na jedné je realizován samotný tester jednotlivých čidel, ze kterého jsou vyvedeny vstupně/výstupní periferie. V horním víku můžeme vidět na Obrázek 25 zapojen displej, enkodér, vypínač, indikační diodu a tři svorkovnice pro připojení testovaných čidel. Dále realizace obsahuje druhou desku, která se stará o napájení a ochranu celého testeru principiálně je tato část popsána v kapitole 3.5 Nabíjení, ochrana a regulace napětí baterie.

Veškeré potřebné periferie pro chod realizovaného testeru jsou umístěny v mnou navrhnuté krabici, která byla vytisknuta na 3D tiskárně v laboratoři EB305. Desky plošných spojů jsou umístěny na vytisknutých distančních sloupcích a upevněny na místě šrouby. Bateriový box pro jednu baterii 18650 je umístěn ve středu vyrobené krabice a je zde pevně připevněn jak sekundovým lepidlem, tak i pro jistotu dvěma malými vruty.

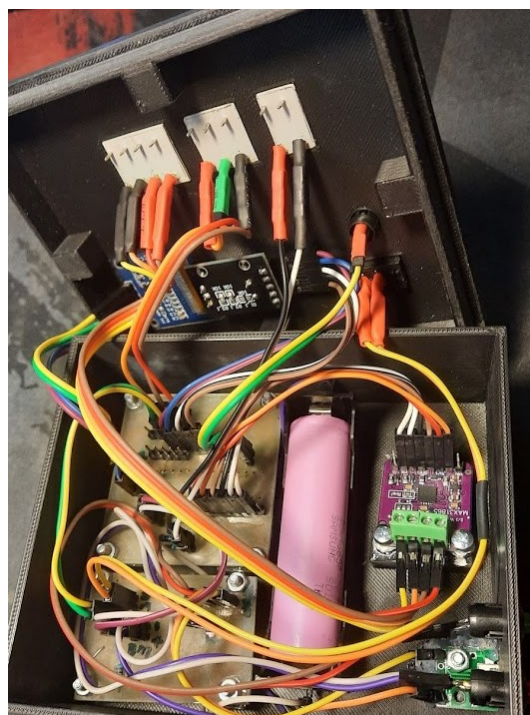
Pro vstup napájení baterie jsem zvolil microUSB konektor. Tento konektor jsem volil z toho důvodu, že se jedná o snad nejrozšířenější konektor pro nabíjení např. telefonů apod., který každý z nás má k dispozici. Konektor je pevně přidělaný ke krabici, aby při vložení napájecího kabelu nedošlo k jeho uvolnění.

Dále na Obrázek 25 je vidět malý fialový modul obsahující měřič odporových teplotních detektorů MAX31865. Tento jediný měřicí obvod není realizován na desce plošných spojů společně s ostatními z toho důvodu, že je velmi obtížný jak jeho způsob zapájení, tak i je špatně k dostání. Je upevněn obdobně jako mnou vyrobené desky plošných spojů.

Na Obrázek 26 můžeme vidět v čele krabice dvě indikační diody. Červená slouží pro indikaci probíhajícího nabíjení baterie a zelená indikuje, zda je baterie plně nabita.



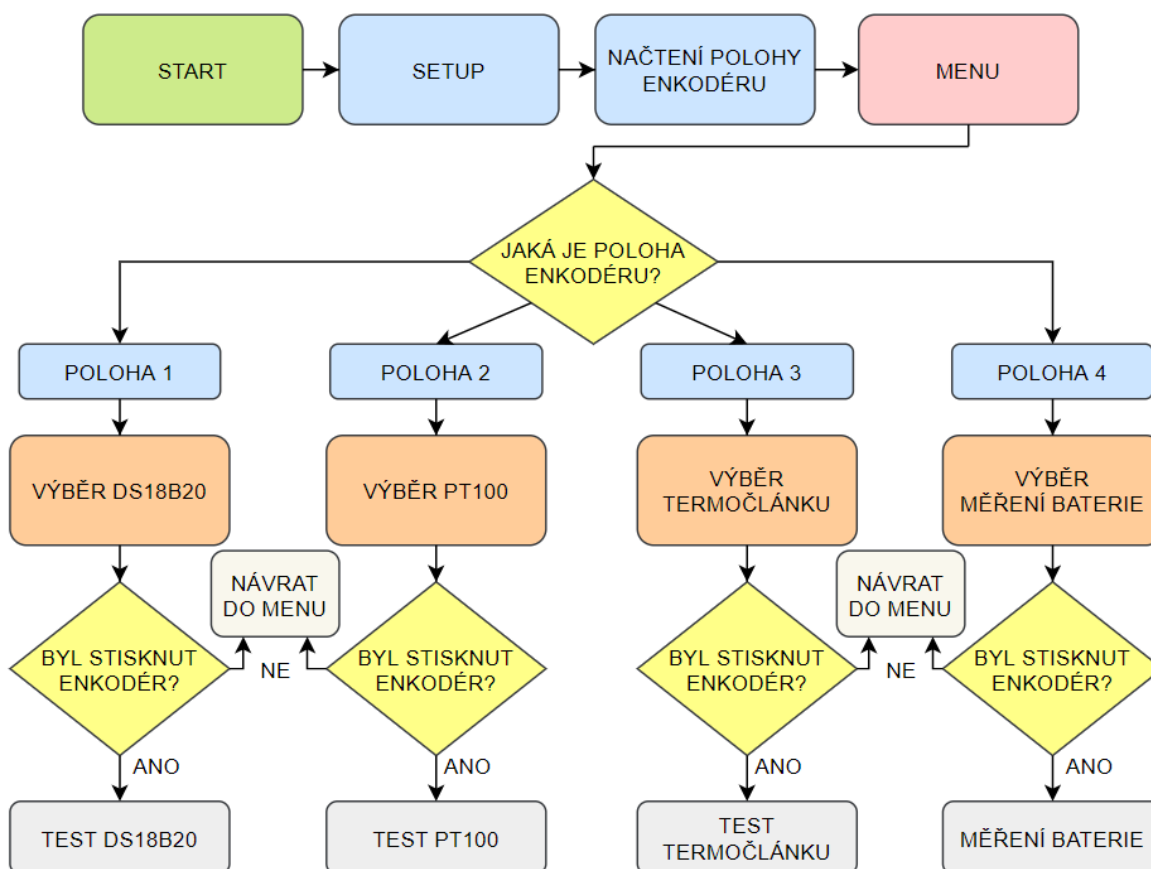
Obrázek 26 - Foto vnější podoby testeru



Obrázek 25 – Foto vnitřní podoby testeru

4 Návrh a implementace SW utility pro ovládání testeru

Po spuštění, proběhne prvotní definování všech nahraných a potřebných knihoven. Poté, co jsou definovány všechny proměnné, přijde na řadu funkce nastavení, která bude spuštěna pouze jednou na začátku zapnutí mikrokontroléru. Nejprve definuje adresování jednotlivých periférií, což znamená nastavení adres jednotlivých prvků multi-masterové počítačové sériové sběrnice I2C (displej, převodník termoelektrického napětí MCP9600 a A/D převodník ADS1115), dále prvků komunikujících po lince SPI a oneWire. Poté jsou inicializovány nastavení jednotlivých použitých pinů, zda se jedná o vstupní nebo výstupní piny. Posléze se vyčte aktuální hodnota enkodéru, aby bylo umožněno pohybu v menu. Dle pohybu enkodéru dochází ke změně proměnné díky, které může být zvolena požadovaná funkce a inicializován test zvoleného čidla.



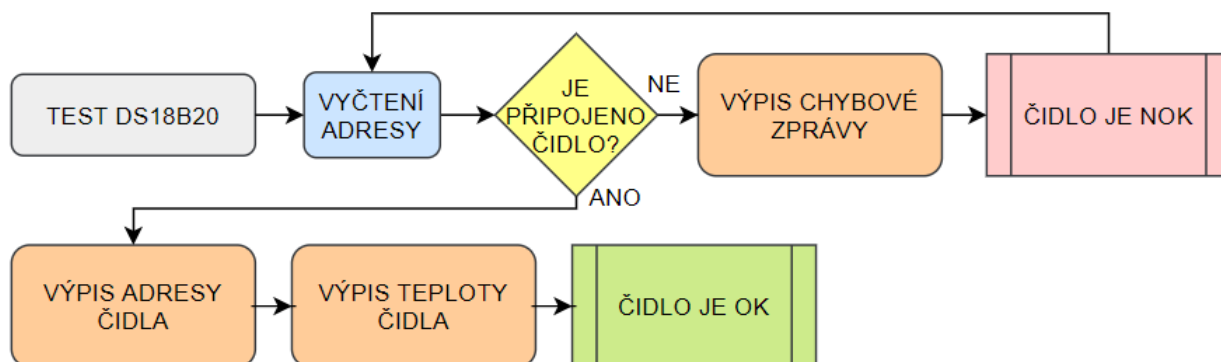
Obrázek 27 – Vývojový diagram hlavní části programu

Ke konci funkce nastavení je na displeji zobrazena krátká animace a vypsán úvodní text pomocí zvané funkce úvod. Počáteční krátká animace slouží i k otestování správné funkčnosti displeje, zda vykresluje určené linie správně. Poté se nejprve vymaže celé zobrazení a nastaví kurzor a velikost písma. Text se zobrazí po dobu 1,5 sekundy a po uplynutí této doby se displej vymaže a vejde do hlavní smyčky MENU.

Funkce hlavní smyčky MENU, je samozřejmě zpracovávána znovu a znovu. První řádek funkce smyčky slouží ke čtení aktuálního stavu enkodéru. Pokud je stisknuto tlačítko enkodéru je zjištěno, v jaké hodnotě se nachází proměnná „counter“ pohybující se ve škále od 0 do 4 a dle dané hodnoty je provedena příslušná akce.

4.1 Softwarová implementace pro DS18B20

Při spuštění funkce pro testování DS18B20, je v prvním řádku kódu inicializován reset „oneWire“ sběrnice. Poté je vyčtena adresa zkoušeného teplotního čidla DS18B20. Pokud čidlo není nalezeno znamená to, že čidlo nefunguje správně a program přejde do výpisu chybového hlášení s výsledkem čidlo je NOK (není v pořádku).



Obrázek 28 - Vývojový diagram testovací logiky pro DS18B20

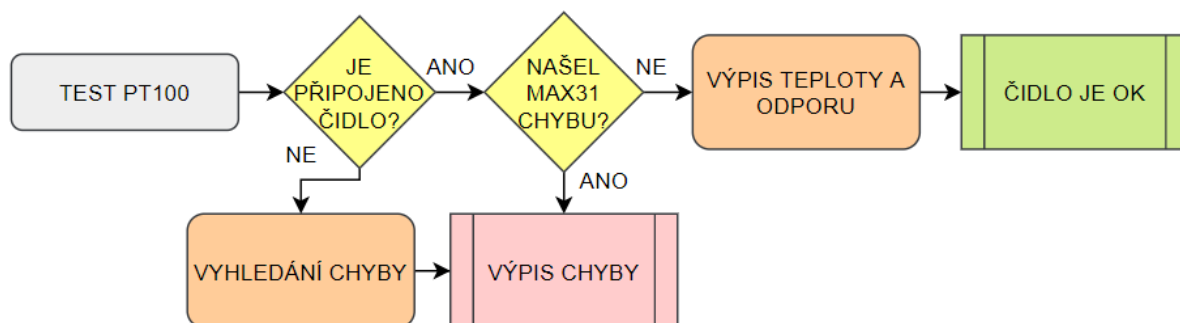
Pokud je správně zjištěno připojení zkoušeného teplotního čidla DS18B20 je následně vypsána jeho adresa a teplota. Dále je zobrazení doplněno o vypsání teploty referenčního teplotního čidla DS18B20, který je umístěn vně implementovaného testeru a následně je čidlo vyhodnoceno jako funkční.

4.2 Softwarová implementace pro PT100

Po výběru funkce pro testování odporového teplotního detektoru PT100 je pomocí interní funkce MAX31865 zjištěno, zda je zkoušené čidlo správně funkční. Pokud ne je opět inicializována interní funkce měřiče odporových teplotních detektorů pro zjištění chyby. Poté je chyba vypsána na displej a čidlo je vyhodnoceno.

Dané zapojení umí vyhodnocovat velké množství možných chyb. Pro příklad:

- Vysokou prahovou hodnotu odporového teplotního detektoru
- Nízkou prahovou hodnotu odporového teplotního detektoru
- Podpětí a přepětí na odporovém teplotním detektoru



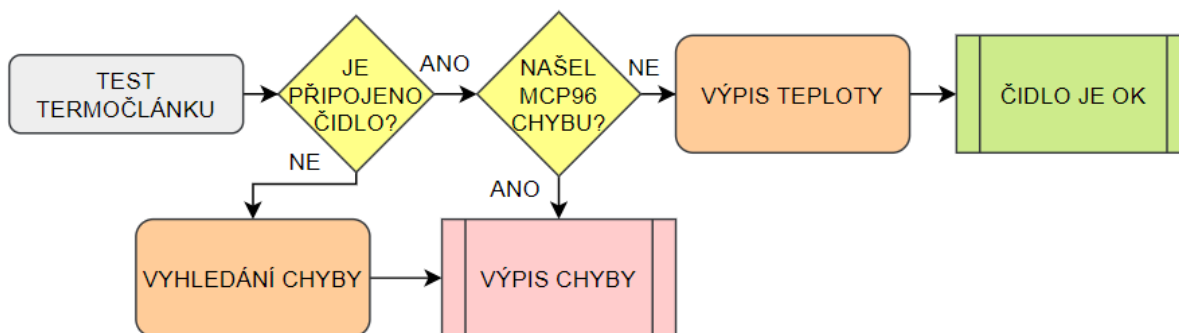
Obrázek 29 - Vývojový diagram testovací logiky pro PT100

Pokud není měřičem odporových teplotních detektorů nalezena žádná chyba je vypsaná hodnota odporu zkoušené PT100 a její aktuální změřená teplota. Jelikož se jedná o 15-ti bitový převodník je zjištěná hodnota teploty pro danou implementaci řešení z pohledu přesnosti ideální. Poté je vypsaní doplněno o hodnotu odporu odporového teplotního detektoru, který je umístěn vně testeru teplotních čidel. Dále je vypsaná teplotní hodnota referenčního čidla PT100. Referenční teplota je vypočtena z koeficientu pro přepočítání ze 16-ti bitového převodníku ADS1115. Přesnost měření je obdobná a opět plně dostačující pro dané použití. Následně po průběhu této procedury je dané zkoušené čidlo PT100 vyhodnoceno jako funkční.

V kódu lze jednoduše přenastavit jaké čidlo bude testováno, ve smyslu, v jakém zapojení bude testované čidlo zapojeno. Měřič odporových teplotních detektorů MAX31865 podporuje testování 2,3 a 4-vodičových zapojení PT100 nebo PT1000, za předpokladu přepsání jednoho řádku lze testovat všechny platinové teplotní detektory.

4.3 Softwarová implementace pro Termočlánek

Po výběru funkce pro testování termočlátku typu K je za pomoci interní funkce převodníku termoelektrického napětí MCP9600 zjištěno správné zapojení zkoušeného termočlátku. V případě, že čidlo není správně zapojeno nebo není správně funkční přejde program do interní funkce MCP9600 pro vyhledání možných chyb. Obdobně jako u měřiče odporových teplotních čidel MAX31865 je daný převodník termoelektrického napětí schopen rozeznat díky použitému zapojení určité chyby v obvodu jako například zapojení na prázdko. Následně po určení možných chyb, dané chyby vypíše na displej.

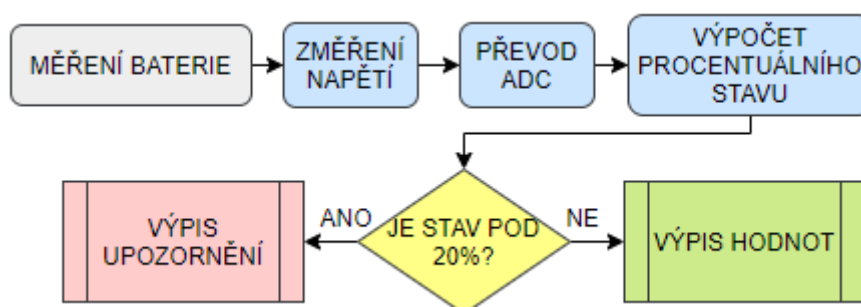


Obrázek 30 - Vývojový diagram testovací logiky pro Termočlánek

Pokud není zjištěna žádná chyba program přejde do funkce pro výpis teploty zkoušeného termočlátku. Daná funkce je stejně jako u předešlých implementací doplněna o výpis teploty referenčního čidla. Zde je jako referenční čidlo použit interní teplotní senzor uvnitř převodníku termoelektrického napětí MCP9600. Posléze je čidlo vyhodnoceno jako funkční.

4.4 Softwarová implementace pro Měření napětí baterie

Pro měření aktuálního stavu baterie je využita jednoduchá funkce pro měření napětí pomocí A/D převodníku. Je využit interní 10-ti bitový A/D převodník mikrokontroléru. V první části kódu je nastaveno použití externího zdroje referenčního napětí. Dále jsou pak definovány potřebné proměnné pro následný přepočítání hodnoty z A/D převodníku na hodnotu změřeného napětí.



Obrázek 31 - Vývojový diagram testovací logiky pro měření napětí baterie

Ze změřeného napětí je v programu implementován přepočítání na přibližný procentuální stav nabití baterie. Dále je vyhodnoceno, zda není procentuální stav baterie nižší jak 20% z celkové kapacity. Pokud ne, funkce vypíše na displej změřené napětí a procentuální stav baterie. Pokud ano tak je ještě výpis doplněn o vypsání upozornění o nízkém stavu baterie a je doporučeno její dobítí.

5 Realizace sady kontrolních měření pro jednotlivé senzory

5.1 Kontrolní měření DS18B20

Z testeru byl vyveden interní referenční teplotní senzor DS18B20 a společně s dalším teplotním senzorem DS18B20 který byl připojen do vnější svorkovnice, byli oba ponořeny do vodní lázně. Teplota vodní lázně byla postupně měněna a měřena referenčním rtuťovým teploměrem.

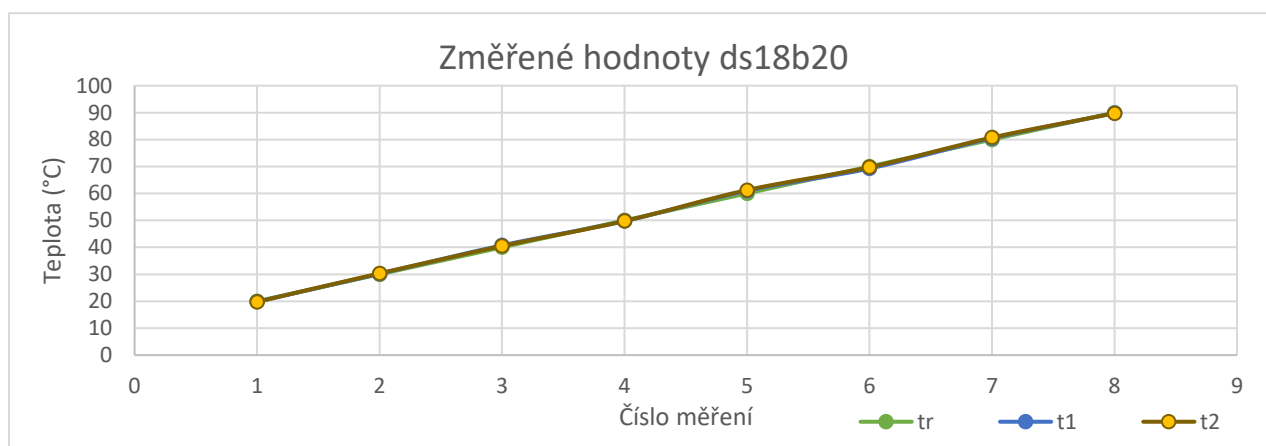
t_r = Teplota změřená referenčním rtuťovým teploměrem

t_1 = Teplota změřená vnitřním teplotním senzorem DS18B20

t_2 = Teplota změřená vnějším teplotním senzorem DS18B20

Tabulka 2 – Změřené hodnoty DS18B20

Změřené hodnoty								
t_r (°C)	20	30	40	50	60	70	80	90
t_1 (°C)	19,80	30,20	40,75	49,75	61,00	69,25	80,50	89,80
t_2 (°C)	19,75	31,35	40,50	49,75	61,25	70,15	79,25	89,75



Obrázek 32 – Graf změřených hodnot DS18B20

Dále byla správná funkce testeru ověřena řadou čidel DS18B20, kdy jsem testoval 10 teplotních čidel DS18B20. Zde tester správně rozeznával adresy a nastavené rozlišení a jedno z čidel které bylo nefunkční.



Obrázek 33 – Foto displeje při měření DS18B20



Obrázek 34 - Foto displeje při měření DS18B20

5.2 Kontrolní měření PT100

Z testeru byl stejně jako v předešlém případě vyveden interní referenční platinový teplotní detektor PT100 a společně s dalším platinovým teplotním detektorem PT100 který byl připojen do vnější svorkovnice, byli oba ponořeny do vodní lázně. Postup měření probíhal stejně jako u DS18B20 popsany v kapitole 5.1 Kontrolní měření DS18B20.

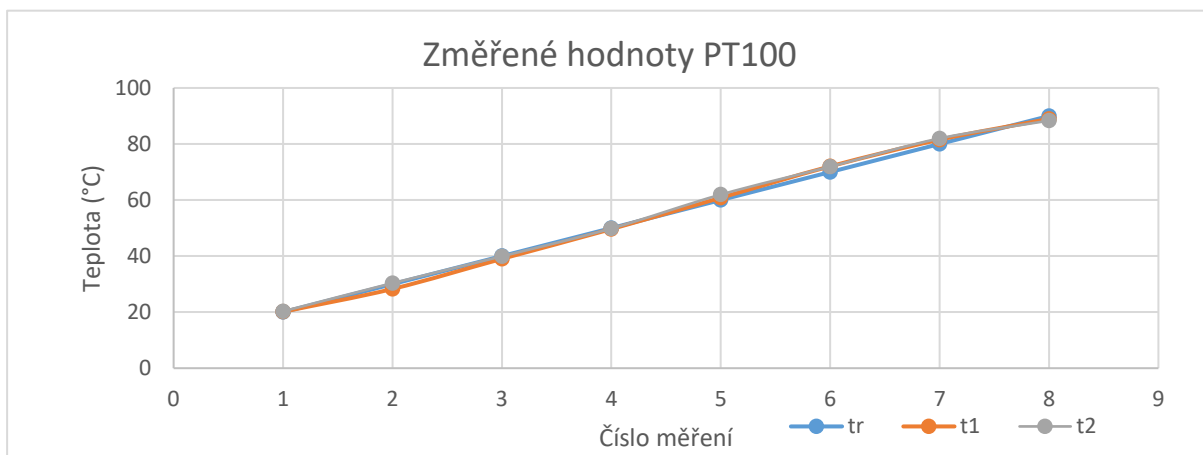
t_r = Teplota změřená referenčním rtuťovým teploměrem

t_1 = Teplota změřená vnitřním teplotním senzorem PT100

t_2 = Teplota změřená vnějším teplotním senzorem PT100

Tabulka 3 – Změřené hodnoty PT100

Změřené hodnoty								
t_r (°C)	20	30	40	50	60	70	80	90
t_1 (°C)	20,147	30,024	39,842	49,632	60,809	72,025	80,541	88,948
t_2 (°C)	21,287	31,361	40,925	50,845	61,952	71,915	81,979	88,337



Obrázek 35 – Graf změřených hodnot teploty čidlem PT100

Tester je navržen tak že po úpravě jednoho řádku v kódu lze testovat 2-vodičové, 3-vodičové a 4-vodičové verze PT100. Proto jsem i tester otestoval těmito zapojeními PT100. Tester fungoval a měřil správně. Poté jsem simuloval různé chyby, které jsou detekovatelné pro měřič odporových teplotních detektorů MAX31865. Stejně jako v předešlém případě tester fungoval správně.



Obrázek 36 – Zobrazení chyby na displeji při testování PT100



Obrázek 37 – Zobrazení na displeji při testování PT100

5.3 Kontrolní měření termočlánku typu K

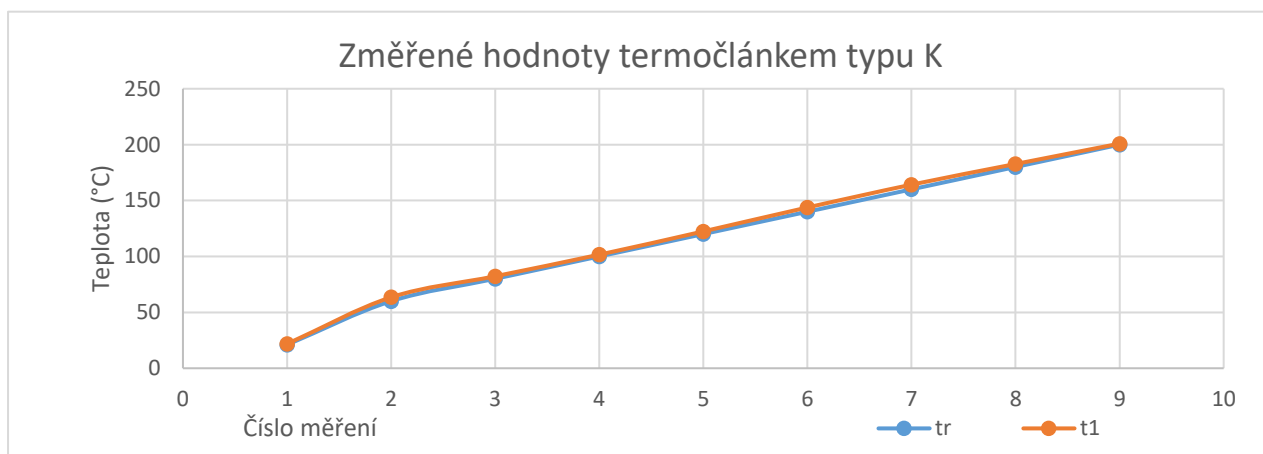
Při měření s termočlánkem typu K jsem nejprve změřil pokojovou teplotu a poté termočlánek dal do pece kde jsem postupně zvyšoval a měřil teplotu. Pro referenční hodnotu teploty jsem využil interní měřič teploty vně pece.

t_r = Teplota změřená interním teploměrem pece (v prvním měření pokojové teploty byl použit rtuťový teploměr)

t_1 = Teplota změřená termočlánkem typu K

Tabulka 4 – Změřené hodnoty termočlánkem typu K

Změřené hodnoty									
t_r (°C)	21	60	80	100	120	140	160	180	200
t_1 (°C)	21,77	61,5	82,3	102,6	122,4	143,8	161,2	179,7	201,9



Obrázek 38 – Graf změřených hodnot teploty termočlánkem typu K

Dále jsem testoval, zda navržený testovací obvod pro termočlánek funguje správně. Po připojení termočlánku typu K do vstupní svorkovnice testeru jsem po navolení v menu provedl testování termočlánku. Tester správně vypsál hodnoty teplého a studeného konce. Jelikož je opět kód navržen univerzálně jako u PT100 tak mohu testovat více druhů termočlánků, zde opět fungoval tester správně. Poté jsem simuloval chybu odpojením jednoho z vodičů ze svorkovnice a tester opět vše náležitě vyhodnotil viz Obrázek 39.



Obrázek 39 – Chybové hlášení na displeji při testování termočlánku typu K



Obrázek 40 – Zobrazení vyčtených hodnot na displeji při testování termočlánku typu K

6 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat tester teplotních čidel DS18B20, PT100 a termočlánek typu K.

Nejprve jsem se seznámil s funkcí jednotlivých senzorů pro měření teploty. V práci byly představeny základní způsoby měření teploty, základní pojmy, teplotní stupnice a veličiny. Dále byly popsány jednotlivé typy teplotních senzorů (termistory, odporové teplotní detektory, termočlánky, pyrometry, polovodičové senzory a další), jejich funkčnost a problematika při testování daných teplotních čidel. V další části práce jsem se zabýval hardwarovým návrhem testeru. Zde definuji, které vstupně výstupní periferie jsem se rozhodl využít a proč. Dále popisuji, jak jednotlivé obvody fungují, jakými funkcemi disponují a jak jsou jednotlivé prvky zapojeny do celkového obvodu.

Při hardwarovém návrhu testeru jsem se snažil celkové zapojení stavět okolo ATmegy328P. Nejprve jsem si vytvořil a zapojil testovací obvody pro jednotlivé senzory které mají být testovány. U návrhu zapojení pro senzor DS18B20, byl postup jednoduchý a stručný, zde jsem testovaný teplotní senzor připojil k digitálnímu vstupu mikrokontroléru společně s referenčním senzorem (DS18B20) a k napájení.

Oproti návrhu zapojení pro DS18B20 byl návrh zapojení pro testování PT100 komplikovanější. Zde jsem si zapojení rozdělil na dvě části (interní referenční čidlo a testované čidlo). Interní referenční čidlo PT100 je napájeno zdrojem konstantního proudu LM334 a hodnota napětí je převedena A/D převodníkem ADS1115 do mikrokontroléru. U testovaného čidla jsem využil měřič odporových teplotních detektorů MAX31865, ten disponuje vším, co je potřeba pro testování platinového odporového teplotního detektoru PT100. Pro zjednodušení práce a programování testování PT100 by bylo dobré do budoucna uvažovat i o použití MAX31865 pro měření obou senzorů, já jsem této možnosti nevyužil z důvodu horší dostupnosti tohoto čipu a větší komplikovanosti jeho pájení.

Návrh zapojení pro testování termočlánku typu K je obdobný druhé části testování PT100. Byl využit měřič termoelektrického napětí MCP9600. Zde by pro ještě lepší způsob testování v budoucnu bylo dobré uvažovat nad využitím MCP9601, který byl v době kdy byla tato práce psána špatně dostupný.

Následně jsem navrhl napájecí, regulační a ochranný obvod testeru, který je implementován společně s nabíječkou pro baterii 18650 na separátní desce plošných spojů a přešel na návrh a realizaci softwaru testeru.

Při návrhu programu pro tester jsem se setkal s obtížemi při kompletaci jednotlivých kódů pro testování čidel. Pro chod všech testovacích logik v jednom kódu jsem využíval většinu SRAM paměti mikrokontroléru. Hlavním zjištěním poté bylo že OLED displej od firmy Adafruit potřebuje pro správný chod a vykreslování až 1200 B volné SRAM paměti. Mikrokontrolér ATmega328p disponuje 2 kB SRAM paměti, tudíž jsem musel značně zredukovat využití této paměti. Toho jsem docílil jednoduchou funkcí „F()“, která po vypsání daného textu na displej ho vymaže z bufferu displeje, a tak nedojde k jeho přetečení a zároveň je využito méně SRAM paměti.

V poslední části se práce zabývá návrhem a provedením sady kontrolních měření. V první řadě bylo ověřeno správné měření a kalibrace vnitřních referenčních čidel. A ověřena správná funkčnost testeru. Po změření interních čidel jsem došel k závěru, že se chovají dle parametrů, které uvádí výrobce. Při testování správné funkčnosti jsem taktéž nenašel žádné závažné vady testeru, pouze jsem upravil kód pro testování termočlásku typu K, který byl špatně nastaven, poté fungovalo vše správně.

Navržený tester je tedy plně funkčním zařízením, které lze dobře využít pro zjišťování správné funkce teplotních senzorů v nedostupných oblastech, kde není nutno senzor z větších hloubek vytahovat a kontrolovat na povrchu, ale může zůstat na svém místě.

Literatura

- [1] JOST, Danny. Fierce Electronics [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-temperature-sensor>
- [2] ROWE, D.M. Heat and Thermoelectric effect [online]. 2006 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Thermoelectric_effect
- [3] ZAMBONI, Jon. The Four Types of Temperature Scales [online]. 2010 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://sciencing.com/countries-use-celsius-8077428.html>
- [4] ARROW ELECTRONICS, INC. Temperature Sensors [online]. 2010 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html
- [5] ELINOFF, Gary. NTC thermistor [online]. 2019 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/>
- [6] ELINOFF, Gary. PTC thermistor [online]. 2019 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ptc-thermistor/>
- [7] JMS SOUTHEAST. What is an RTD? [online]. 2007 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.jms-se.com/rtd.php>
- [8] REOTEMP, Instruments. What is a Thermocouple? [online]. 2018 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.thermocoupleinfo.com/>
- [9] KELLER HCW. Principles of non_contact temperature measurement [online]. 2018 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.keller.de/en/its/pyrometers/applications/basics/principles-of-non-contact-temperature-measurement.htm>
- [10] KREIDL, Marcel. [i]Měření teploty, senzory a měřicí obvody.[/i] 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [11] MICHALSKI, L., K. ECKERSDORF, J. KUCHARSKI and J. MCGHEE. [i]Temperature Measurement.[/i] Chichester: Wiley, 2001. ISBN 978-0471867791.
- [12] NORTHROP, Robert B. [i]Introduction to instrumentation and measurements.[/i] Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1466596771.
- [13] NASIR, Syed Zain. Introduction to DS18B20 [online]. 2019 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/2019/01/introduction-to-ds18b20.html>
- [14] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Microchip ATmega328P [online]. [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>
- [15] THOMAS PUBLISHING COMPANY. Types of Noncontact Sensors [online]. [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-noncontact-sensors/>
- [16] HOTSET ČR S.R.O. Bezkontaktní teploměry a průmyslové termokamery Optris [online]. [cit. 2020-12-26]. Dostupné z: <https://hotset.cz/kategorie/optris/>

- [17]CIRCUIT GLOBE. Optical Pyrometer [online]. [cit. 2020-12-18]. Dostupné z:
<https://circuitglobe.com/optical-pyrometer.html>
- [18]SHENZHEN H&M SEMICONDUCTOR CO.LTD. DW01A [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z:
<http://hmsemi.com/download/DW01A.PDF>
- [19]MICROCHIP TECHNOLOGY INC. MCP1700 [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP1700-Low-Quiescent-Current-LDO-20001826E.pdf>
- [20]SHENZHEN CANSHENG INDUSTRY DEVELOPMENT CO.,LTD. FS8205A [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/976676/CanShengIndustry/FS8205A/1>
- [21]NANJING TOP POWER ASIC CORP. TP4056 [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z:
<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>
- [22]MOHAN, Jha, Chandra. Měření teploty. Springer New York, 2015. ISBN 978-1-4939-2581-0.
- [23]COMPONENTS101 A.C. Electrical components [online]. [cit. 2021-1-27]. Dostupné z:
<https://components101.com/sensors/ds18b20-temperature-sensor>

Seznam příloh

Následující přílohy byly vloženy do systému IS EDISON

- A. Schéma zapojení testeru teplotních čidel
- B. Schéma zapojení nabíječky baterie 18650
- C. Návrh desky plošných spojů testeru teplotních čidel
- D. Návrh desky plošných spojů nabíječky baterie 18650
- E. Implementovaný kód
- F. Návrh spodního dílu krabice pro 3D tisk
- G. Návrh vrchního dílu krabice pro 3D tisk